低耗能人工光源與高效能熱泵技術在農業之應用研發

方煒

國立台灣大學生物產業機電工程學系 教授

摘　要

本文旨在介紹低耗能人工光源與高效能熱泵技術在農業的應用與研發，首先分別介紹兩者各自的應用領域，包括發光二極體在植物生產的應用與雙效熱泵在諸多領域的可行應用範疇。其次介紹兩者在植物工廠領域的整合應用，並釐清一些被誤導的迷思。最後針對不同氮源、碳源與能源系統之整合應用提出設計。

一、 低耗能人工光源在農業的應用與研發

長久以來在農業生產上，螢光燈管與高壓鈉燈是最主要也最普遍的人工光源。如何補光、提高補光均勻度、調整光質與研發更高效率的人工光源一直是學界研究的重點。近年來光電技術的進步大幅提昇了發光二極體 (LED) 的亮度與效率，又因量產、競爭與達成投資回收所造成價格的降低，LED 取代日光燈光源應用在量產規模的組培苗栽培及作物栽培的日子已經來臨。

發光二極體具有高光電轉換效率、使用直流電、體積小、壽命長、波長固定與低發熱等幾項優點，相較於目前使用螢光燈或高壓鈉燈為人工光源的系統而言具有光量可調整、光質 (紅/藍光比例或紅/遠紅光比例) 可調整、冷卻負荷低與允許提高單位面積栽培量等優點，因此對封閉有環控的農業生產環境 (如植物組織培養室、植物生長箱等) 是一種非常適合的人工光源。

在 1990 年代初期，美國太空總署首創 LED 應用於太空農業上， 迄今 LED 已經被應用於許多植物光生理領域的研究或植物栽培上，例如藻類培養生物反應器、葉綠素生合成研究、光型態發生及光合作用等研究上。在作物種類上許多作物或花卉已經被證實可成功的應用 LED 來栽培，包括有：萵苣、胡椒、胡瓜、小麥、菠菜、虎頭蘭、草莓、馬鈴薯、蝴蝶蘭、白鶴芋及藻類 (方與饒，2004；方與林，2005; 方，2006)。其中，在藻類栽培上證實只需要紅光 LED 即可，但是對其他植物而言，除紅光外，藍光與遠紅光光量大小同時會影響生長及型態發生。不同紅、藍與遠紅光組合光源光譜可以影響並控制某些植物病源菌的發生。近期更被應用於植物工廠作為短期葉菜類立體化栽培的人工光源。

二、 高效能熱泵技術在農業的應用與研發

熱泵與空調是一體的兩面，使用冷能時稱為空調，使用熱能時稱為熱泵。如圖 1 所示 (方，2009)，只做冷氣使用時，COP 為 4~5，這代表耗一分電力可吸取 4~5 倍的熱能，只做暖氣使用時 COP 為 5~6，這代表耗一分電力，可供應 5~6 倍的熱能。其額外的熱能來自於吸熱端，這吸熱端的熱源可以是大氣、土壤、河川溪流或地下水等。只需要暖氣或熱水的場合，使用熱泵不僅節能，更能減少二氧化碳的排放。如圖 2 所示 (林，2009)，COP 為 3.5 的熱泵用於供暖，可以比燃油暖氣機減少 54 % 的二氧化碳排放量。這數字取決於各地電力來源的發電方式，日本每單位電量的二氧化碳排放係數是 0.4 kg，台灣約為 0.6，中國則約為 1 kg。

節能效益更為可觀的則是將之應用於能夠同時利用冷能與熱能的地方，譬如旅館、飯店業，美容理髮業等同時需要冷氣與熱水；溫泉與 SPA 業者同時需要冷氣、冷水與熱水；近海養殖漁業需要將引入的海水殺菌與降溫；蘭花業者需要暖氣抑梗與冷氣催花；菇類業者需要高溫滅菌與冷氣等均屬之 (方與陳，2005)。如圖 1 所示，可同時使用時，COP 為兩者之相加，約為 9~11。

蝴蝶蘭催花所需的空調系統，需要維持溫室內 25/20 度 C 的日/夜溫度，蝴蝶蘭抑梗所需的加熱系統，需要溫室內全年維持 28 度 C 的溫度。一般業者前者使用空調設備降溫，後者使用燃油加溫機產生熱風或使用鍋爐產生熱水。不僅設備費用提高，對環境的負擔也大。另外，在寒流來襲時，溫室內也不宜低於

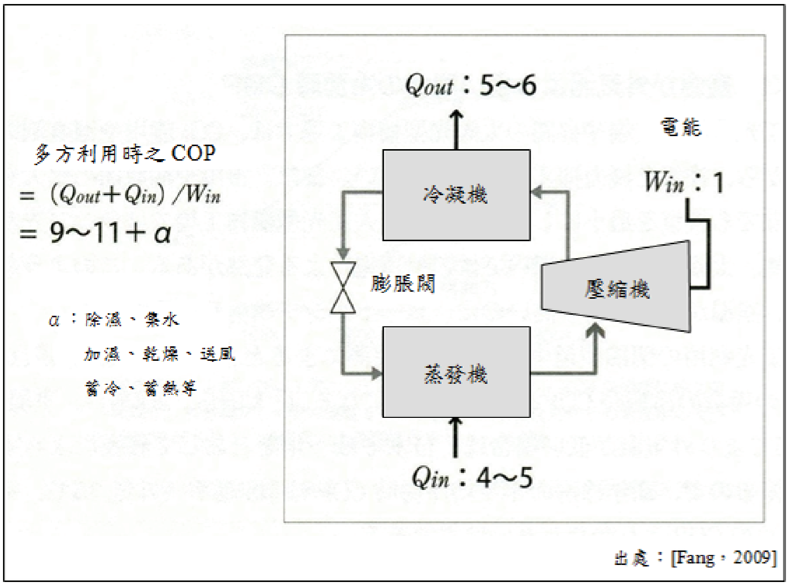

圖1. 雙效空調熱泵之性能係數 (COP)

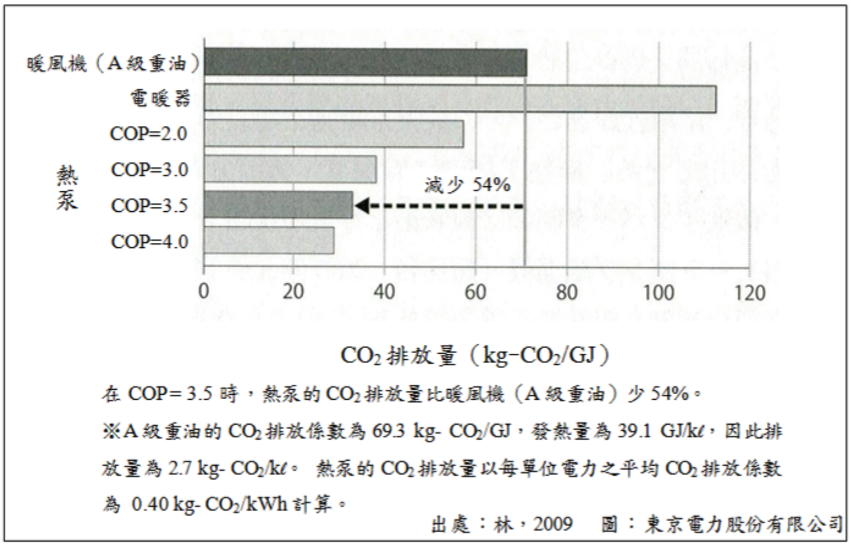

圖2. 使用不同供暖設備供應 1 GJ 熱能之二氧化碳排放比較

18 度 C 的低溫，加熱為蝴蝶蘭栽培的必需設備。本研究繼過去開發的加溫降溫與除濕三合一設備之外，擬開發可直接搭配業者現有冷氣系統使用的廢熱回收專用機。該設備可直接取代加溫設備，用來生產熱水作為介質高溫滅菌、作為組培瓶高壓蒸汽殺菌釜所需蒸汽的前段預熱或者提供生活所需熱水，節約加溫成本。

乳牛數在 200 頭以內的酪農戶，儲乳槽一般使用的冷凍系統的主機為兩台 5 噸的壓縮機，冷媒經熱排散熱再經膨脹閥降壓之後，在儲乳槽內提供冷卻能力。每次擠乳之後，則需透過 75 度 C 高溫熱水沖洗管路，以達殺菌之目的。高溫熱水的產生通常透過電熱系統，將常溫水加熱至目標溫度。本研究旨在透過第一年度建立的熱回收裝置回收儲乳槽冷卻系統所產生的廢熱，直接用於產生 75 度 C 熱水，提供擠乳管路的消毒滅菌之用。新廠可以不需安裝電熱設備，降低投資成本；舊廠亦可不需啟動該電熱設備，只利用其儲水桶存放熱水。

部分菇類的生產需要長期低溫的環境，譬如目前盛行的健康食品中的巴西蘑菇與冬蟲夏草的生產，吃火鍋必備的金針菇的生產等，前二者在採收後也需要使用燃油加溫機進行乾燥，採收後未立即烘乾者則需要將生鮮產品作低溫冷藏。針對乾燥產業的應用，譬如：現階段低溫乾燥使用空調機，熱氣則對外排放，高溫乾燥則使用燃油加溫機。低溫乾燥可產生良質米但乾燥時間久，高溫乾燥可快速完成乾燥作業但亦造成穀粒胴裂，兩者可合併應用，充分達到最佳化目標。另外，使用低濕空氣進行常溫乾燥之設備，亦可以使用空調熱泵系統對引入的空氣做降溫除濕與回溫。

綜上所述多種領域均有使用空調熱泵的空間，若能導入高效能系統，可有大幅度的節能減排效果。不僅在農業上有不少應用空間，在工商業界的應用領域也非常廣泛。

三、 低耗能人工光源與高效能熱泵技術在農業的整合應用

植物工廠是實現農作物周年穩態量產的高效能農業體系，可分為兩大類：「太陽光與人工光併用型」與「完全人工光控制型」。

第一類「太陽光與人工光併用型」植物工廠以溫室設施搭配人工光源為主，雖然一般很少使用空調熱泵系統，但如果栽培的作物經濟價值很高，則搭配熱泵使用也是常見。譬如蝴蝶蘭的催花與抑梗溫室，又譬如洋桔梗的育苗溫室或者是蔬菜作物的種苗溫室，國內都已經有業者投資建置大規模廠房。比較可惜的是人工光源的應用在國內還在啟蒙階段，在歐、美、日等國早已是常態。

在此類設施應用空調時，應著重於夜間的降溫，當使用水耕栽培系統時，應著重於水體的降溫。在白天要想將溫室內的熱能以冷氣移走，其耗費的空調成本是相當大的。

第二類「完全人工光控制型」植物工廠的常見樣態是使用隔熱材料與外界隔離的環控室，以使用人工光源搭配熱泵系統為主，這是設施園藝的最高級發展階段，也被認為是 21 世紀農業取得革命性突破的重要技術手段之一。在此所謂的環控包括了氣體與水體環境的控制，可分為風、光、水、養、氣五大類。「風」泛指空氣溫濕度與風速，「光」泛指光量、光質與光週期，「水」泛指灌溉水供給時機、頻度與供給量，「養」泛指灌溉水中包含的營養成分，「氣」指的是空氣中的二氧化碳濃度。

在此類設施內，主要的光熱成本會是人工光源與空調熱泵系統的電費，由於人工光源會伴隨熱量的衍生，空調熱泵系統一般只會用到空調的功能，如果空調系統的性能係數(COP)是 3，人工光源的電費是 X，則整個系統的光熱成本將會是 $X + X/3$。

台灣過去在 80 年代推動溫室水耕栽培，曾經成為風潮，但後續一間間關廠。主要原因在於夏季無法栽培、蔬菜口感不佳等問題。但這些因素都不會在植物工廠內重現。譬如夏季無法栽培的主因在於溫度，尤其是因為水溫提高造成溶氧量降低，植物根系無法呼吸導致容易腐敗。口感不佳則是養液配方的問題，一成不變的高氮肥配方，容易造成硝酸鹽與亞硝酸鹽含量過高，缺乏回饋控制的灌溉與營養管理模式，當然栽培的蔬菜口感差。

過去水耕的失敗經驗在農政官員、農民與研究者的心中可能已經形成魔障。另外，在某些消費者心中甚至有著無土栽培的蔬菜代表缺乏日月精華的迷思。這些都是台灣推動植物工廠有待跨越的障礙。

台灣的學術界對於植物工廠的推動也有一些雜音，網路上找到一篇中興大學某教授的文章，該文引用日本的舊資料，但解讀有明顯錯誤。該文提到：

在成本比較方面，則顯示此為植物工廠的致命傷。以日本農林水產省的調查數據為例，在 2005 年，1 公頃的植物工廠其成本與養液栽培用溫室之比較如下：

	植物工廠(A)	*溫室栽培(B)*	*A/B*
設置成本	*3.1 億日圓*	*1800 萬日圓*	*17 倍*
能源成本	*1860 萬日圓*	*40 萬日圓*	*47 倍*

依上述討論，完全控制型植物工廠在技術層面簡易可行。在市場面則應慎重。不可盲目擴增造成同質性產品在有限消費市場相互削價競爭，最後為同歸於盡。如果只是在科博館，在大學農學院，各農業改良場搭建一兩棟全密閉式植物工廠，只要有經費那倒是十分容易，也可做為科學教育之用。但是要以此型全密閉型植物工廠就可以開創農業生機，就可以以此給農民帶來利潤，那只是欺己欺人而已。

首先，日本迄今都沒有一公頃的植物工廠。其次，如果是一公頃的溫室，全年的能源成本只有 40 萬日圓，這也是很難想像。在台灣，一千坪 (約 1/3 公頃) 的溫室，寒流期間一個月的加溫費用就不只這個數字。

筆者查到該表格來自日本農林水產研究報告編號 14 號，出版於 2005 年。原文如下所示：

表６　植物工場と施設生産のコスト比較（10a当たり）
植物工場の建設費、維持費は従来の施設に比べてはるかに高額です。

	植物工場1）（A）	施設生産2）（B）	A／B
設置コスト	3.1億円	1,800万円	17
ランニングコスト（光熱費）	1,860万円	40万円	47

1）植物工場は、K社TSファームタイプ（720㎡）の完全制御型施設の値に基づく
2）施設生産は、ビニールハウスでホウレンソウ等の養液栽培を行うM農園（858㎡）の値に基づく

由原文可發現，該教授誤解了日本使用的面積單位，10a 並非一公頃，而是 0.1 公頃 (1000 m^2)。植物工廠 A 引用的數據來自一間 720 m^2 的植物工廠，設施生產 B 引用的數據則來自一間 858 m^2 的農園。為了方便比較，原文作者將數據調整成 1000 m^2。再者，此表格為五年前的老舊數據，不適合用於現在來評估植物工廠之可行性，主要原因有三：

1. 在日本早已了解採用 TS 式的植物工廠 (上表附註 1)的光熱費用太高，類似工廠多已被淘汰或是慘澹經營中。TS 代表 Triangle panel and Spraying technology，這是早期使用保麗龍架成三角形狀的栽培床，使用高壓鈉燈為人工光源的系統。產能比傳統的溫室生產方式增加有限 (約為 1.4 倍)，耗電與成本卻都多太多了。現在受到重視都是採用高效能螢光燈管、LED (Light-Emitting Diod 發光二極體) 或是 HEFL (Hybrid Electrode Fluorescent Lamp 混極螢光燈管) 等，此些燈管的效能高且散熱少，光熱費用比使用高壓鈉燈的情況要低很多。
2. 植物工場的設置成本由 2005 迄今已經降低了很多，並且持續降低中。 於 2008 年四月落成的 Fairy Angle 公司設於福井縣的植物工廠為全日本目前規模最大的，年產量達 300 噸，每日量產 8000 株萵苣，建築面積占地 2896 平方米，公司資本額約 600 萬美金，在當年約為 6 億日圓。由於該公司有兩間量產廠 (年產量 300 與 150 噸)與三間餐廳 (年產量 6 噸)，推估單間量產廠的造造價應低於 3.1 億日圓，而此廠的規模比起前述表格的 TS 型態的植物工廠 (720 m^2)大了不只四倍。
3. 兩種設施的產能相差很大，以土地面積為比較基準並不合理，合理的比較方式應該是以年產能做為基準。依據千葉大學古在教授的比較，在相同年產能的前提下，植物工廠的造價可以比溫室低。

日本目前有 50 家植物工廠，但總共生產的萵苣在市場的佔有率也不過是 0.5 %。再者，適合植物工廠栽培的作物選擇仍有極大的限制，目前在擔心植物工廠會對傳統農業造成衝擊與排擠是過慮了。再者，植物工廠不應被狹隘的認為只是為農業帶來生機，為農民帶來利潤的工具，植物工廠有著更大的格局及與時俱進的時代意義。

四、 氮源、碳源與能源系統之整合

空調熱泵與 LED 在植物工廠產業中可有極佳的整合應用，雖說前者的應用以降溫為主，但回收的熱能可搭配其他產業使用，譬如前述菇類的生產。再者，菇類的生產可產生高濃度二氧化碳，這些也正是植物工廠內蔬菜栽培之所需，所以除了熱能可以互借使用之外，氣體成分中的二氧化碳與氧氣也可以互補有無。這樣的設計在生態循環的觀點來看更具意義。另外，植物工廠亦可與循環水養殖做整合設計，後者的養殖廢水中含有高濃度的硝酸態氮，正是前者栽培之所需，兩者整合應用可兩蒙其利。類似設計可參見方(2009)申請之專利。LED 使用市電，後續可搭配再生能源譬如風能、太陽能、生質能與燃料電池等。

五、結　論

LED 除了在環控農業領域取代傳統人工光源使用之外，在作物栽培模式，銷售運輸模式與儀器研發上都有發展空間。動、植物與人體光生理學都是值得深入了解與待開發的領域。尤其是後者，不論是儀器設備的研發或成效的調查，都屬生機領域跨入醫學工程領域很好的切入點。此類研究的進行與落實研究成果需要跨領域的合作與推動，是值得吾人後續努力的方向。

本文亦討論熱泵系統在生物產業的應用，其在工商業界舉凡需要同時使用冷氣與熱水的美髮業、飯店業、SPA 業、食品加工業等亦有廣泛的應用空間。此種方式的能源的再造利用不僅可以降低對環境生態的影響，降低加熱系統成本，更可以有正面的意義。一旦所有鍋爐由熱泵取代，後者對環境吸熱亦有助於抒解全球的暖化問題、都市的熱島問題等。

LED 與空調熱泵在植物工廠可發揮大效用，也都還有極大的進步空間，與其他氮源、碳源與能源系統的整合更值得進一步探討。

參考文獻

1. 方煒，饒瑞佶。2004。高亮度發光二極體在生物產業的應用。中華農學會報。5(5):432-446。
2. 方煒、陳育瑋。2005。雙效型冷凍空調熱泵及其在生物產業的應用。農機/生機論文發表會。
3. 方煒、林清源。2005。發光二極體在生物產業的應用。農機/生機論文發表會。
4. 方煒。2006。發光二極體在生物產業應用的回顧與前瞻。照明學刊。23(1)：26-32。
5. 方煒。2009。結合碳源及或氮源設施之複合式植物工廠。中華民國與中國發明專利。(申請中)
6. 林真紀夫編著。2009。有效利用設施園藝中的熱泵-節能與多方利用-。農業電化協會，159 pp。
7. Fang, W. 2009. Use of heat pumps for energy-saving in protected cultivation. Symposium of controlled closed systems toward efficient bioproduction. Matsudo, Chiba, Japan.